

Двадцать четвертая международная
конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА"

«Моделирование
эвапотранспирации агроэкосистем
на основе энергобалансовых,
имитационных моделей и
машинного обучения»

Доброхотов Алексей

ФГБНУ АФИ, отдел физики, физико-химии и биофизики почв

Москва, 9 - 13 ноября 2026 г.,



Структура доклада

1. Энергетический баланс
2. Точность энергобалансовых моделей
3. Коррекция ошибок модели
4. От мгновенных значений к сезонным
5. Вэб-интерфейс



Структура доклада

- 1. Энергетический баланс**
2. Точность энергобалансовых моделей
3. Коррекция ошибок модели
4. От мгновенных значений к сезонным
5. Вэб-интерфейс



Rn

РАДИАЦИОННЫЙ
БАЛАНС

Приходящая
коротковолновая
радиация

Rsd

Отражённая
коротковолновая
радиация

$R_{su} = (1 - \alpha) \times R_{sd}$

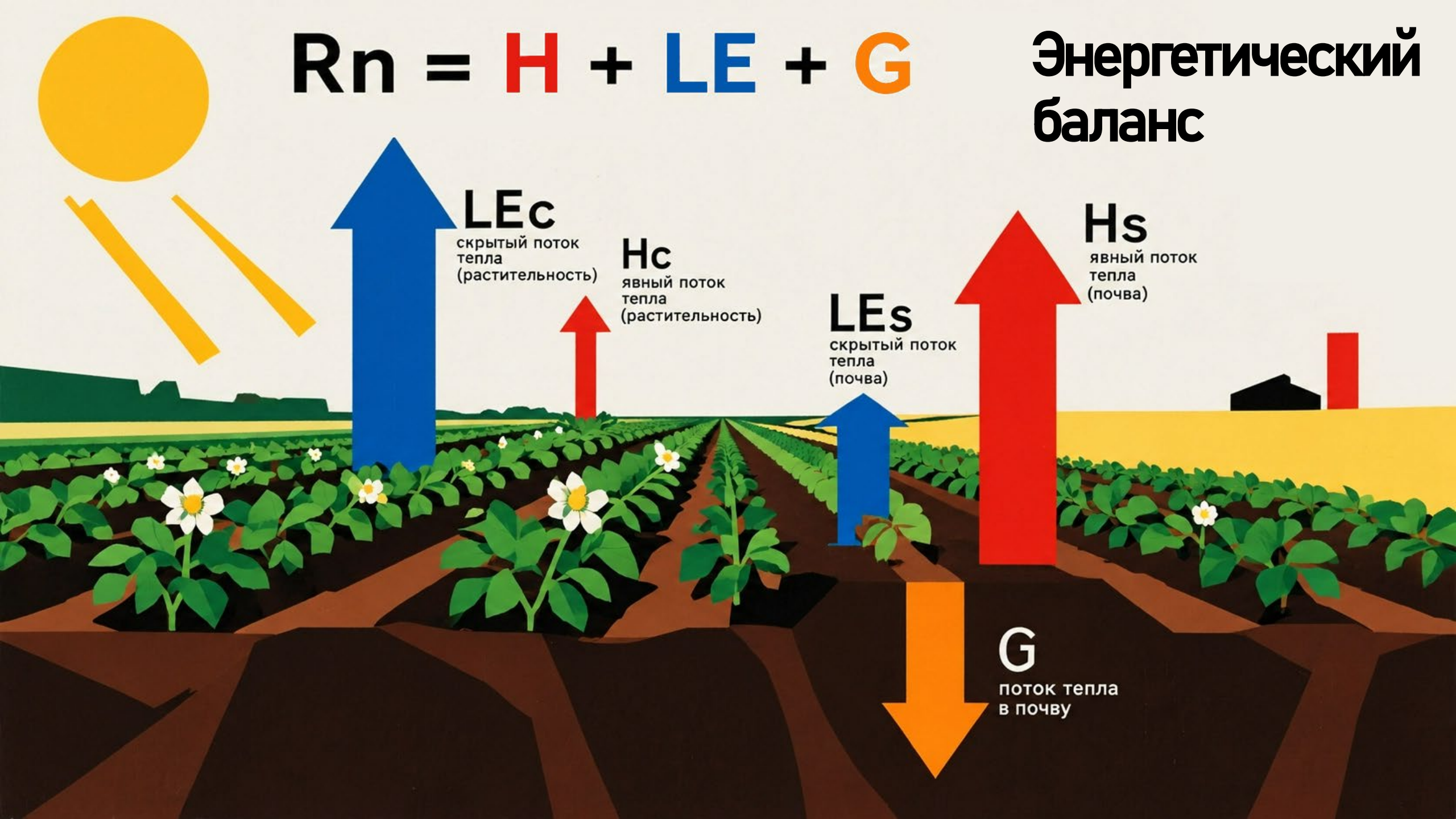
Приходящая
длинноволновая
радиация

Rld

Уходящая
длинноволновая
радиация

Rlu




$$R_n = H + LE + G$$

Энергетический
баланс

LE_c

скрытый поток
тепла
(растительность)

H_c

явный поток
тепла
(растительность)

LE_s

скрытый поток
тепла
(почва)

H_s

явный поток
тепла
(почва)

G

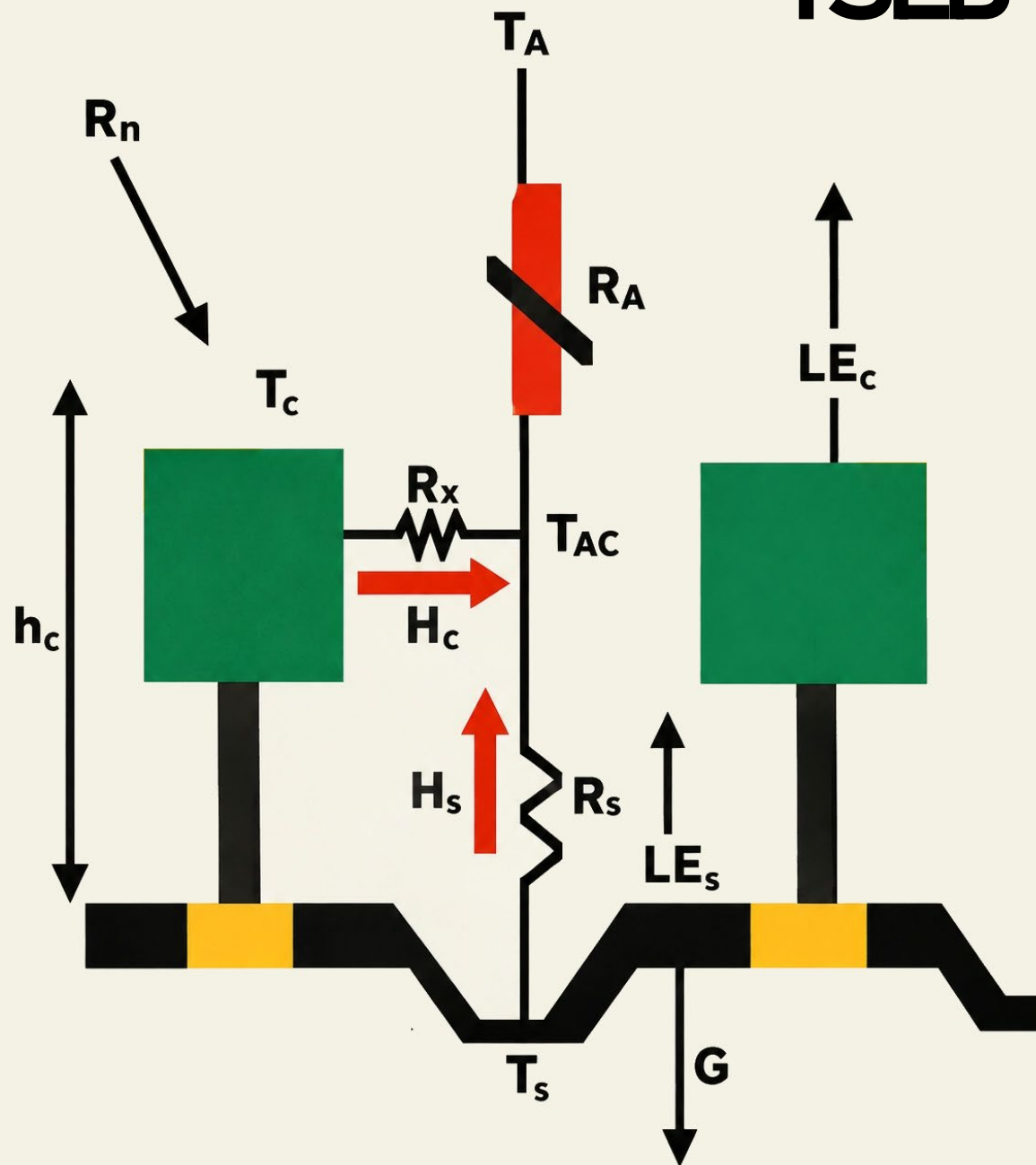
поток тепла
в почву

Структура доклада

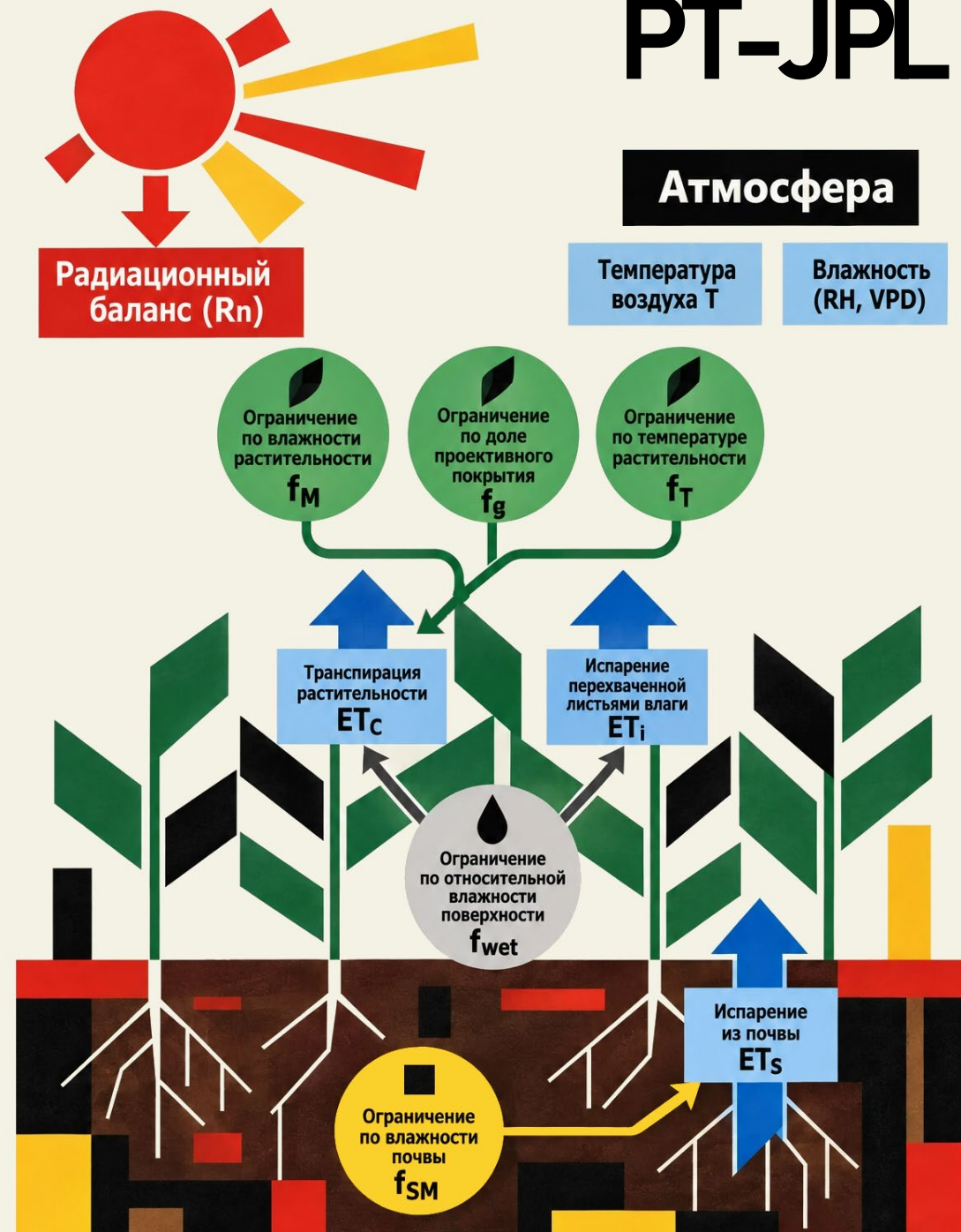
1. Энергетический баланс
- 2. Точность энергобалансовых моделей**
3. Коррекция ошибок модели
4. От мгновенных значений к сезонным
5. Вэб-интерфейс



TSEB

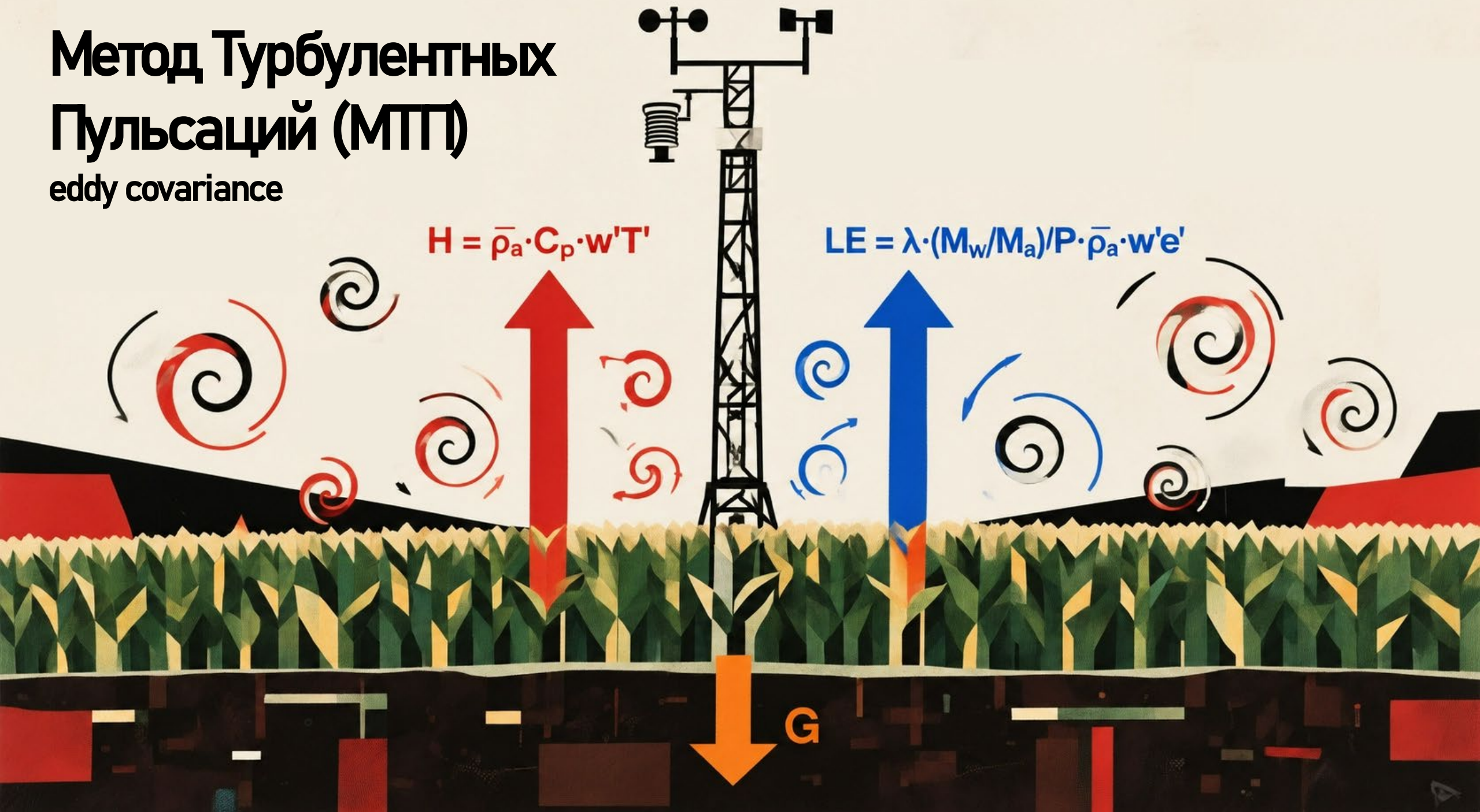


PT-JPL



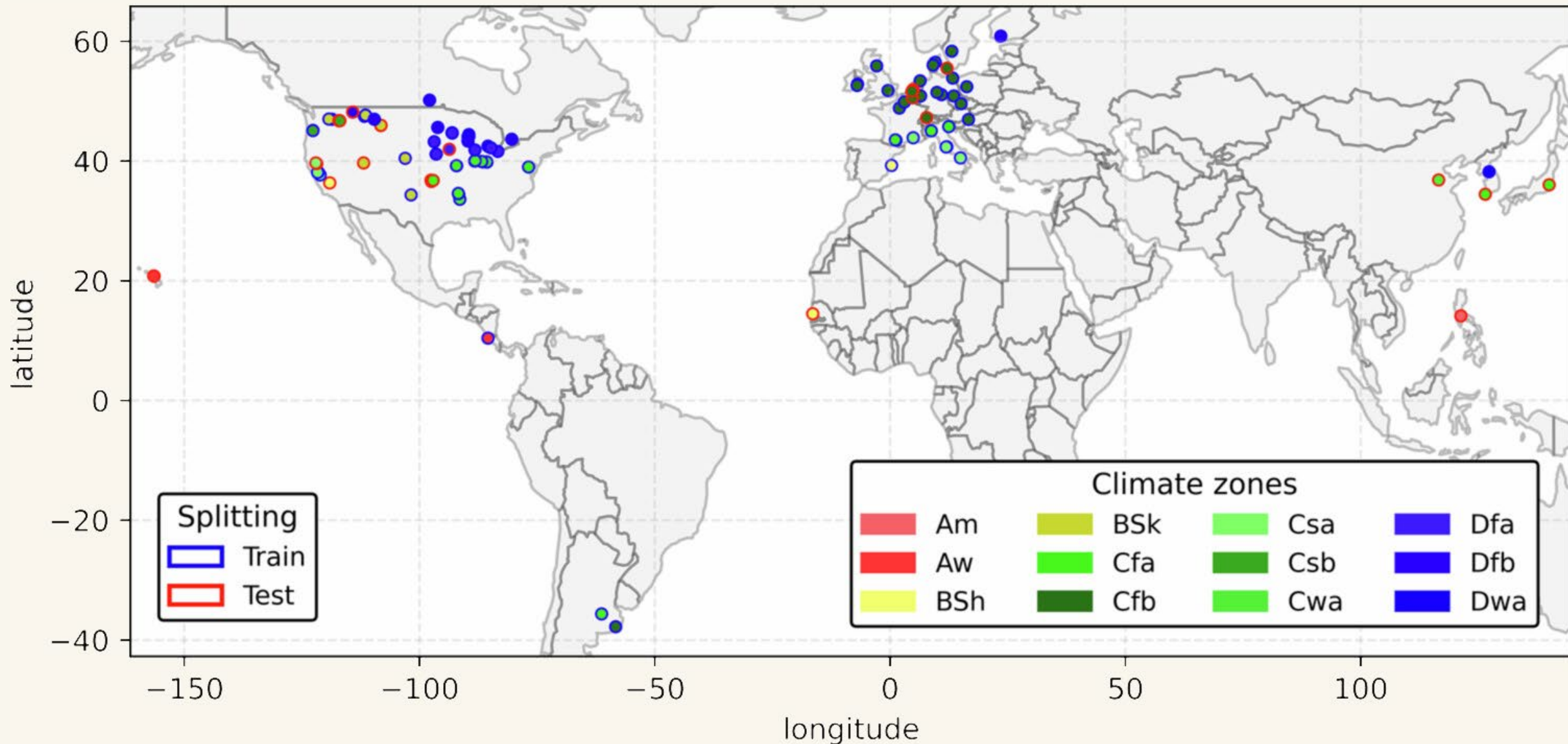
Метод Турбулентных Пульсаций (МТП)

eddy covariance



Данные для оценки точности моделей

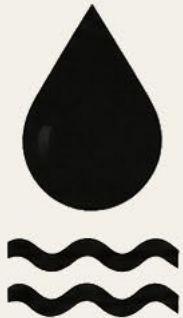
137 пульсационных станций (МТП)



Входные данные для моделей TSEB и PT-JPL

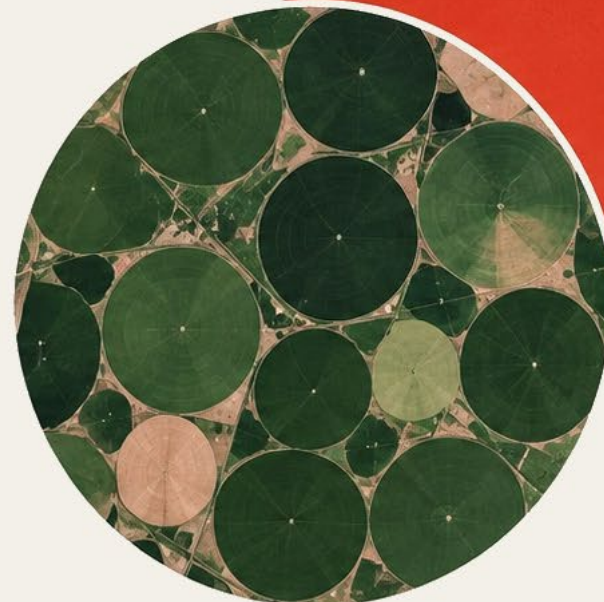
Метеорологические данные

Климатический реанализ
ERA5-Land

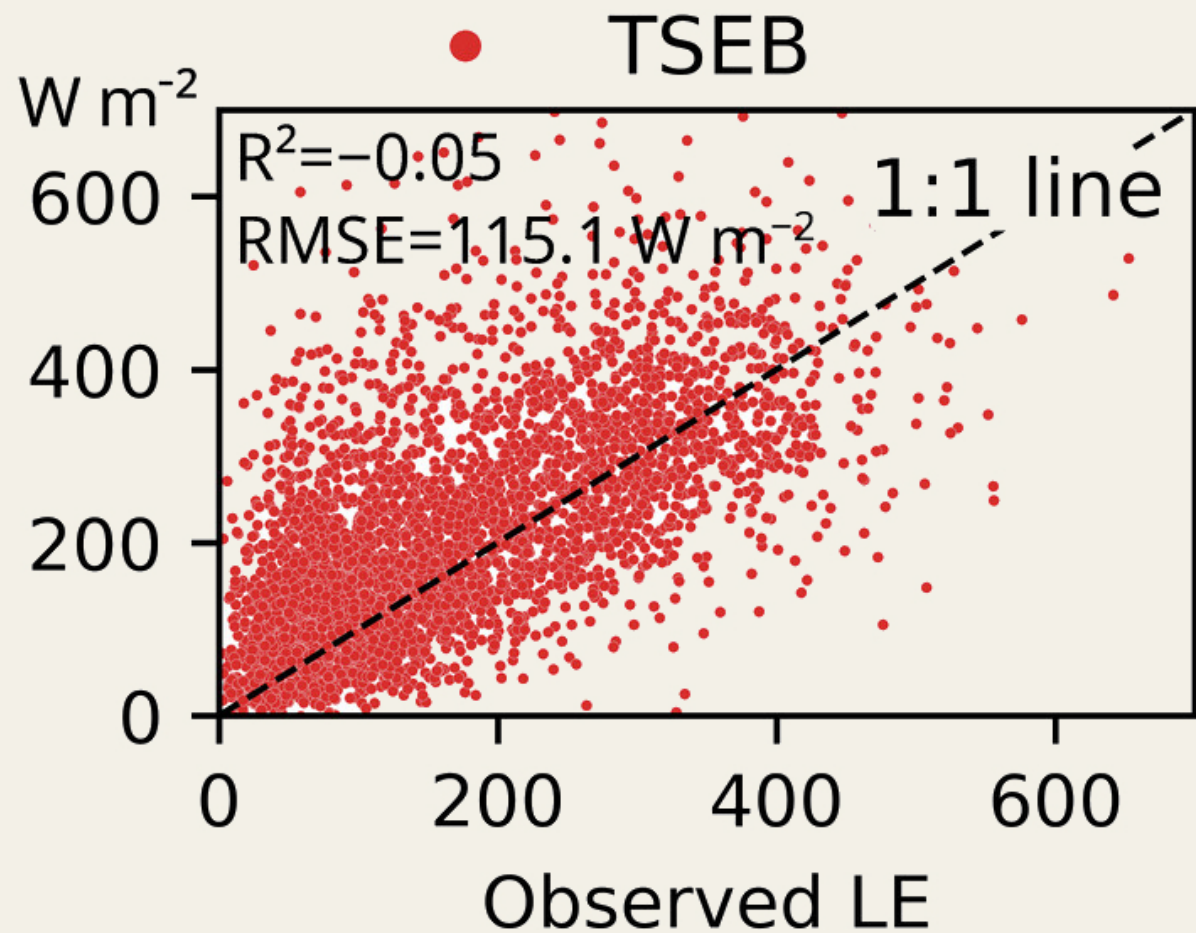
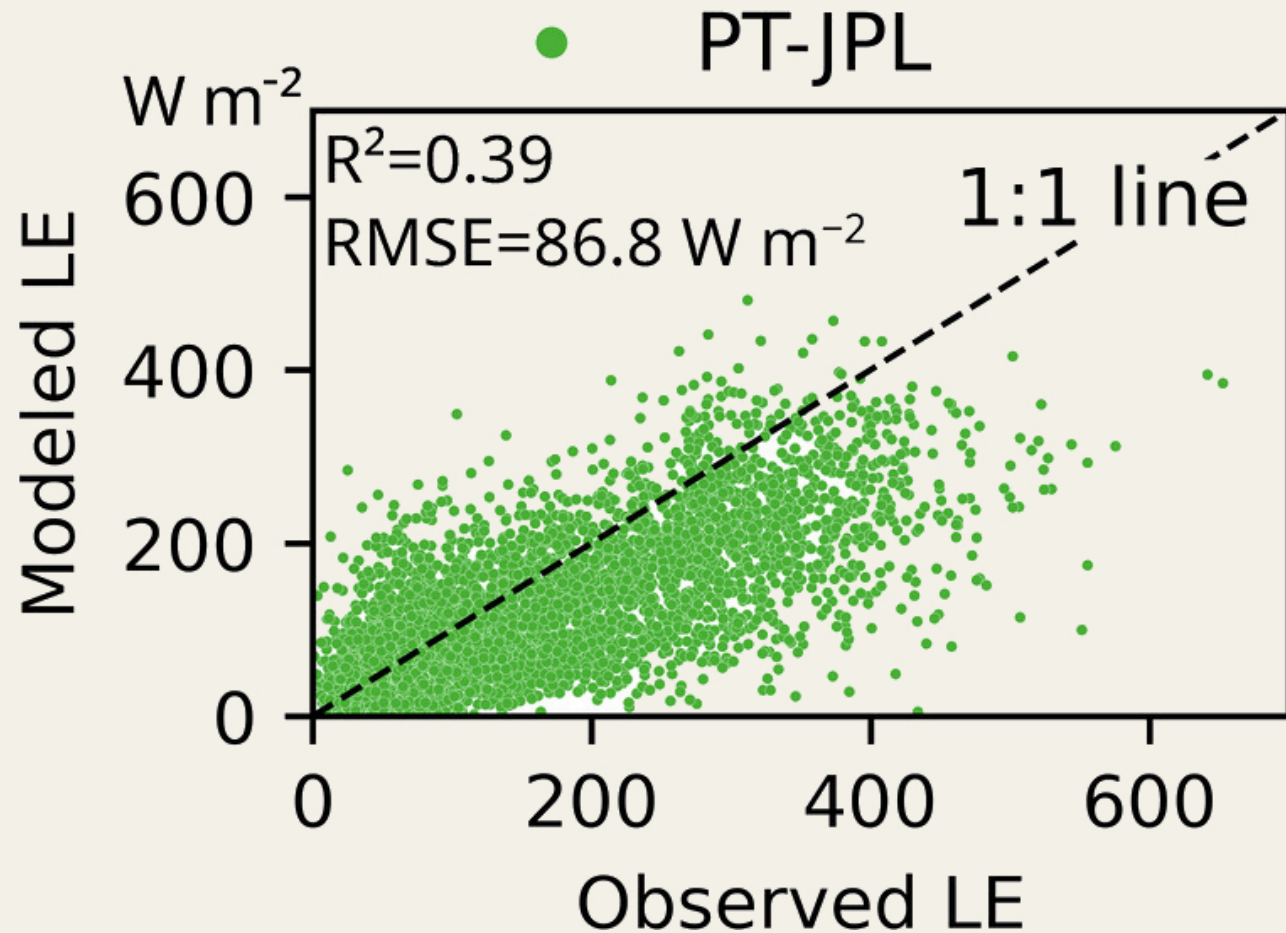


Данные дистанционного зондирования

Спутники Landsat 8-9



Сравнение точности моделей TSEB и PT-JPL



Структура доклада

1. Энергетический баланс
2. Точность энергобалансовых моделей
- 3. Коррекция ошибок модели**
4. От мгновенных значений к сезонным
5. Вэб-интерфейс



1. Data collection

Eddy covariance
(Flux networks)



Remote sensing
(Landsat 7-9)



Climate
(ERA5-Land)

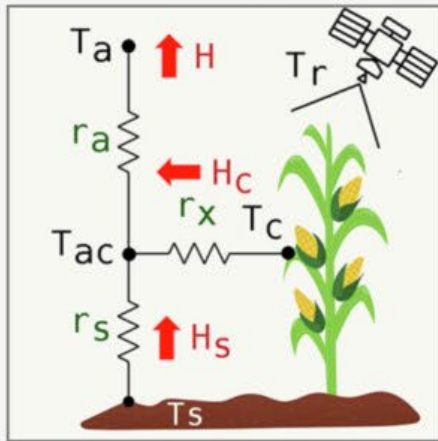


Soil
(SoilGrids)

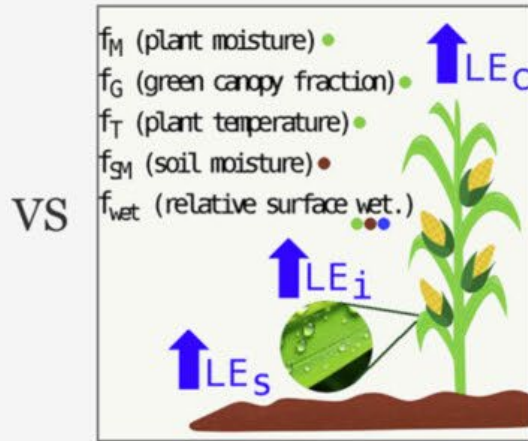


2. Energy balance model comparison

TSEB



PT-JPL



VS

3. Best model latent heat flux (LE) residuals calculation

$$LE_{res} = LE_{obs} - LE_{model}$$

4. ML residuals predictor

$$LE_{res} = f(\text{remote sensing}, \text{climate}, \text{soil})$$

1. Data splitting

(grouped split by station)



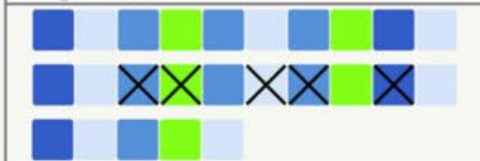
2. Hyperparameters

(GBM tune, no overfitting)



3. Feature selection

(RFECV optimization)



4. Interpretation

(Feature importance, SHAP values, PDP)



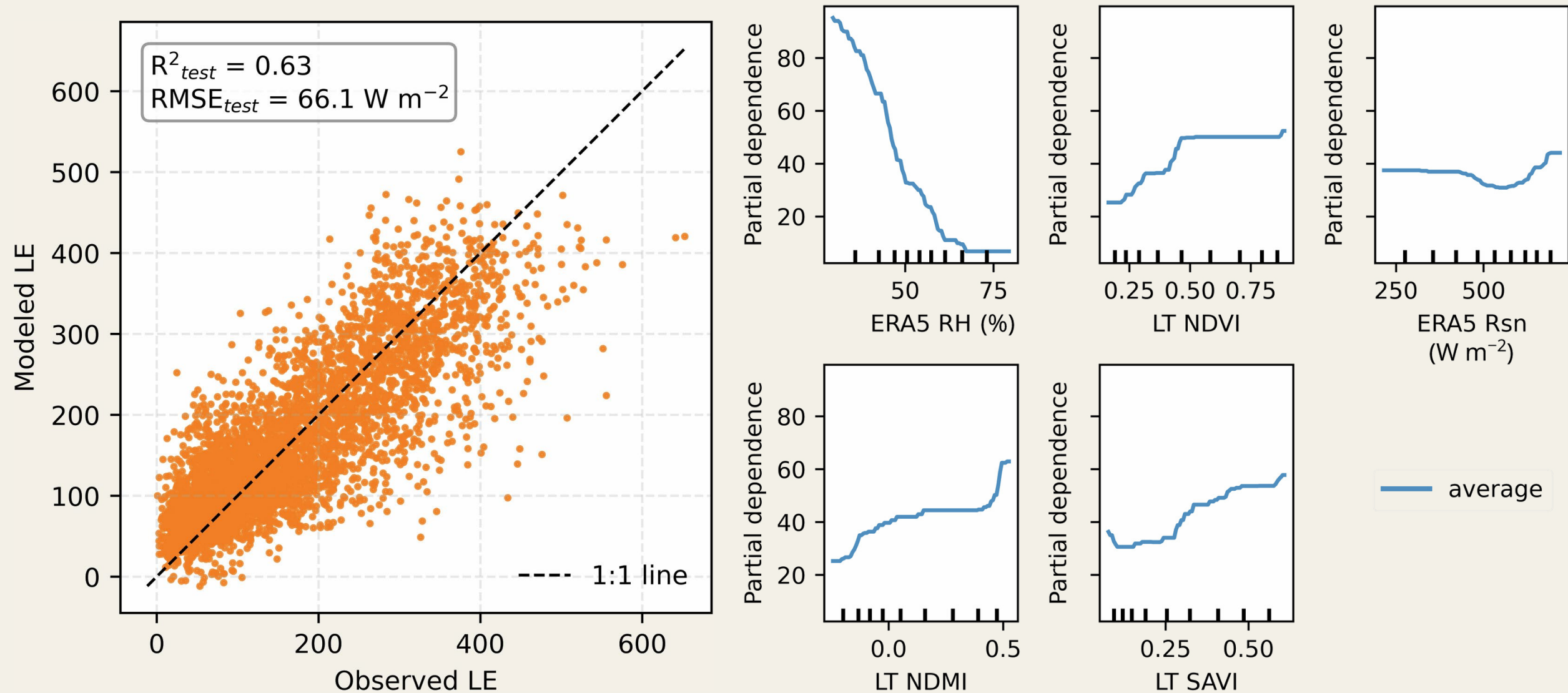
5. ML-corrected latent heat flux partitioning

$$LE_c^{ML-corr} = LE^{ML-corr} \times (LE_c^{init} / LE^{init})$$

$$LE_s^{ML-corr} = LE^{ML-corr} \times (LE_s^{init} / LE^{init})$$

$$LE_i^{ML-corr} = LE^{ML-corr} \times (LE_i^{init} / LE^{init})$$

ML-RT-JPL коррекция остатков модели RT-JPL с помощью машинного обучения (ML)



Структура доклада

1. Энергетический баланс
2. Точность энергобалансовых моделей
3. Коррекция ошибок модели
- 4. От мгновенных значений к сезонным**
5. Вэб-интерфейс



Переход от мгновенных значений LE (ET_{inst}) в момент пролета спутника к суточным ET_{24}

1

$$ET_{24} = EF \times Rn_{24}$$

$$EF = \frac{LE}{Rn - G} \quad \text{(часть доступной энергии, которая тратится на эвапотранспирацию)}$$

Расчет LE, Rn, G из модели PT-JPL, а Rn_{24} из реанализа ERA5-Land

2

$$ET_{24} = ETr_F \times ETr_{24}$$

$$ETr_F = \frac{ET_{inst}}{ETr_{inst}} \quad \text{(актуальная ET / потенциальная ET)}$$

Расчет ET_{inst} через LE из модели PT-JPL, ETr_{inst} — эталонная эвапотранспирация (испаряемость), рассчитанная по формуле Пенмана-Монтейса FAO-56, метеоданные из реанализа ERA5-Land

МЕТРИКИ
КАЧЕСТВА



EF:

$$R^2 = -1.32$$

$$RMSE = 2.39 \text{ мм/день}$$



ETr_F :

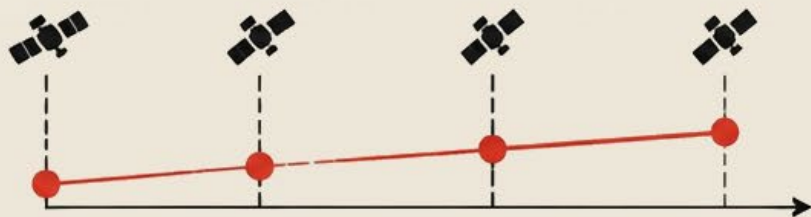
$$R^2 = 0.55$$

$$RMSE = 1.05 \text{ мм/день}$$

Переход от суточных значений ET_{24} к сезонным ET_{season}

1 $ET_{season} = PT-JPL + ETr_F$

Линейная интерполяция ETr_F
между пролетами спутника



2 $ET_{season} = PT-JPL + WOFOST$

Имитационная модель для интерполяции
 ETr_F между пролетами спутника



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ WOFOST 8.1

Инициализация:

метеорологический блок – ERA5-Land,
почвенный блок – SoilGrids,
начало и конец вегетации - LAI Landsat
(индекс листовой поверхности)

Настройка параметров модели:

ассимиляция данных
(ансамблевый фильтр Кальмана)
LAI и ET_{24} из PT-JPL
в модель WOFOST

МЕТРИКИ КАЧЕСТВА:

**PT-JPL +
 ETr_F**

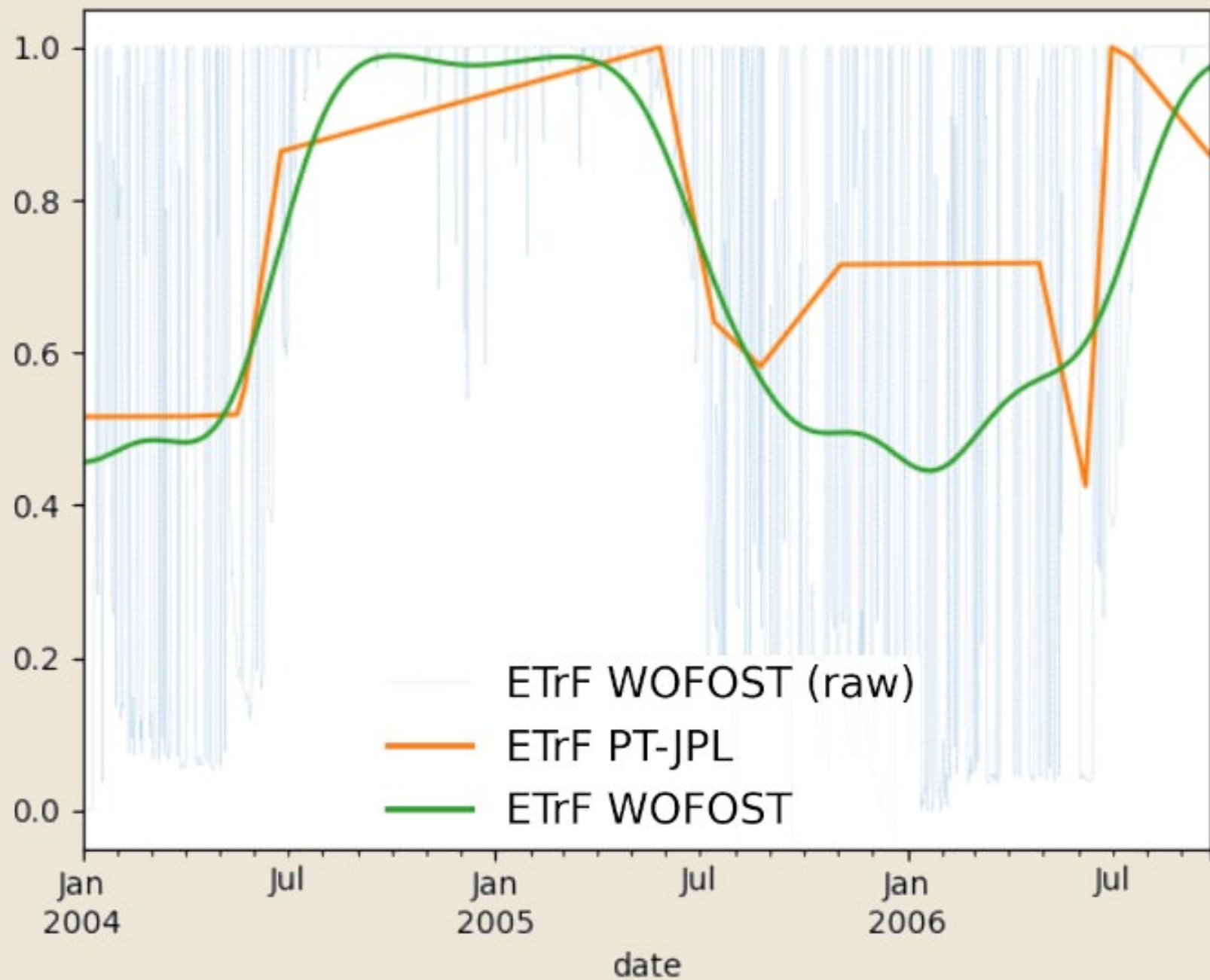
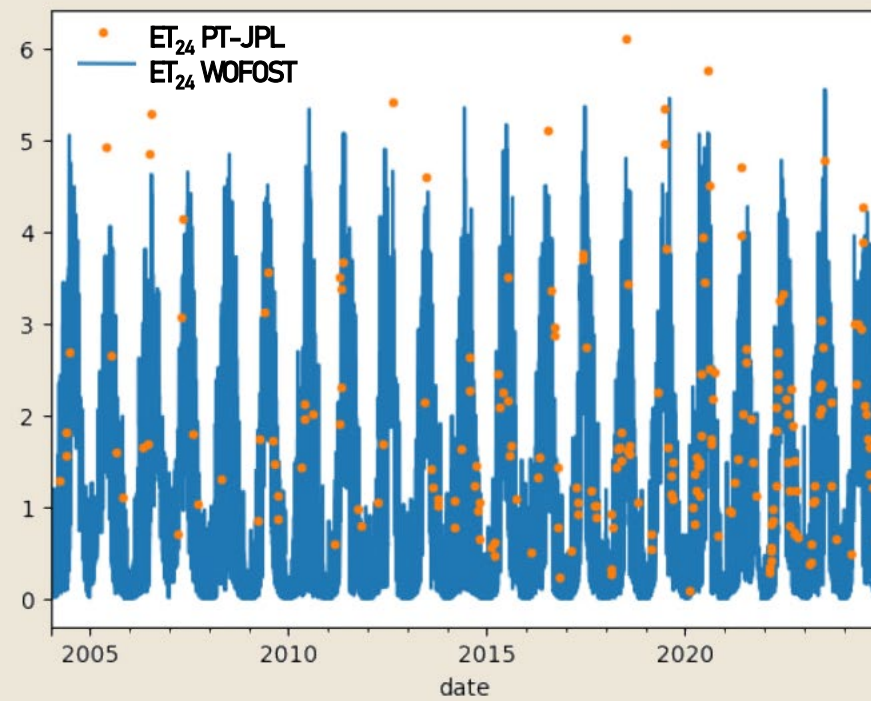
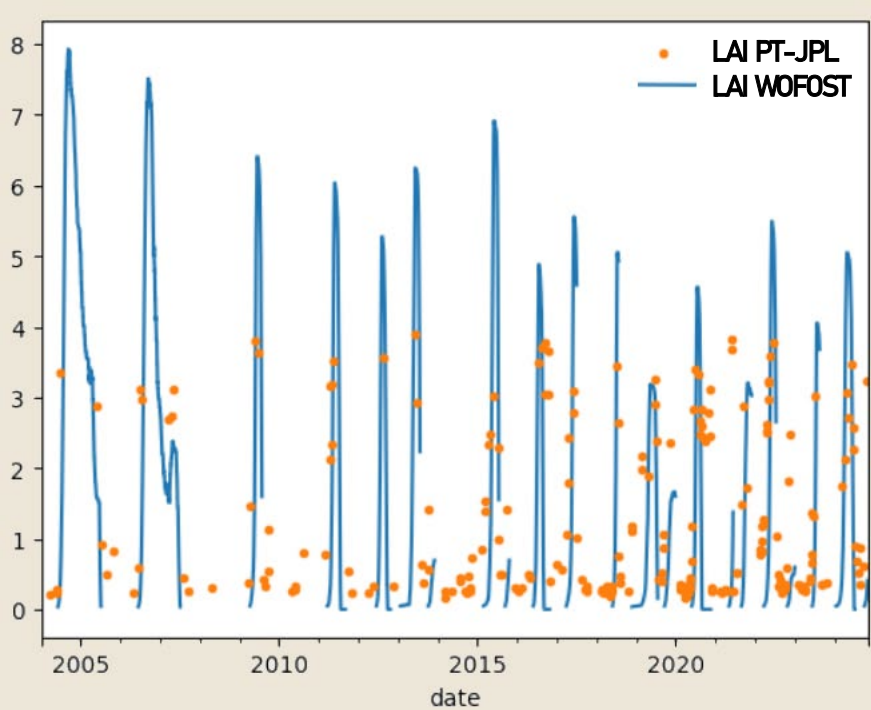
$R^2 = 0,68$

RMSE = 20,2 мм/месяц

**PT-JPL +
WOFOST**

$R^2 = 0,57$

RMSE = 23,4 мм/месяц



Структура доклада

1. Энергетический баланс
2. Точность энергобалансовых моделей
3. Коррекция ошибок модели
4. От мгновенных значений к сезонным
- 5. Вэб-интерфейс**





Instructions

1. **Select area input method** - either upload a shapefile or draw a polygon on the map
2. **Choose date range** for the analysis
3. **Select method** (ML PT-JPL or Original PT-JPL)
4. **Set maximum cloud cover** percentage
5. **Specify output paths** for results
6. **Click 'Run PT-JPL Model'** to start processing



Input Parameters

Select area input method:

- ☒ Upload shapefile
- ☐ Draw polygon on map

Upload shapefile (.zip (shp), .geojson, .gpkg)



Language / Язык

English



Map Controls

Select Date

2024-08-17



Select Band

Band 19 - ET (Evapotranspir...



Selected: 2024-08-17



Band: 19/21



Date Range

Start Date

2024/05/01

End Date

2024/08/31

Select Method

ML PT-JPL



Processing & Results

Current Configuration

Start Date: 2024-05-01

End Date: 2024-08-31

Method: ML PT-JPL

Max Cloud: 20%

PT-JPL Output: ./data/images/

Meteo Output: ./data/meteo/meteo.feather



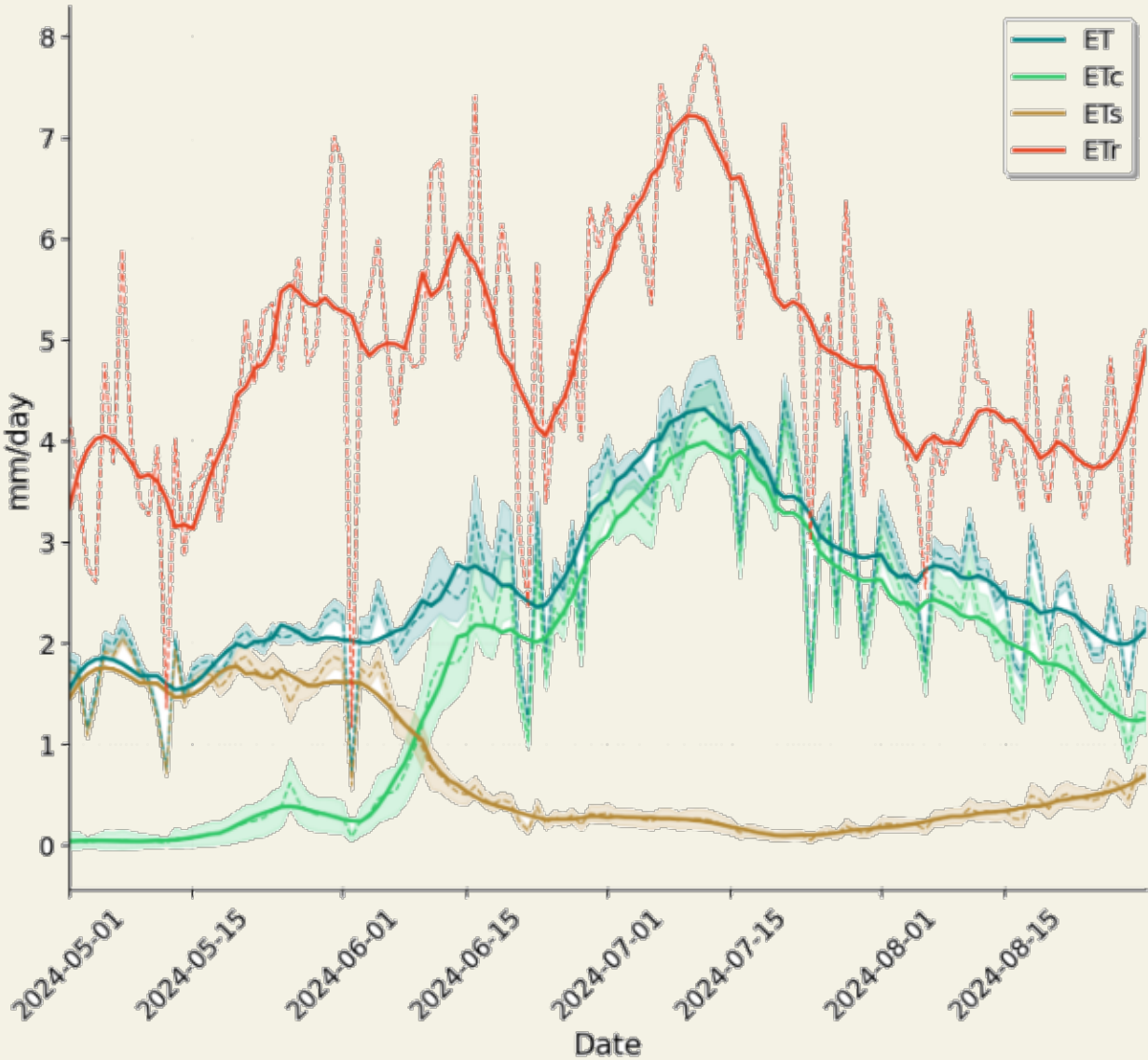
Run PT-JPL Model



Results



ET — actual evapotranspiration, ETc — transpiration
ETs — soil evaporation, ETr — reference ET



Map Viewer

2024-07-15

ET (Evapotranspiration, mm/day) - Band 19



<https://agroet.streamlit.app>

БЛАГОДАРЮ
ЗА
ВНИМАНИЕ